



III-121 – ESTUDO PARAMÉTRICO DO ALCANCE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM CORRIDAS DE DETRITOS

Gustavo Ferreira Simões⁽¹⁾

Engenheiro Civil (UFMG), Mestre e Doutor em Engenharia Civil (PUC-Rio), Professor Associado do Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia da UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Mateus Antônio Nogueira Oliveira

Engenheiro Civil (UFMG), Ex-bolsista de Iniciação Científica vinculado ao Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia da UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Endereço⁽¹⁾: Escola de Engenharia da UFMG. Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia. Av. do Contorno, 842 / 608 – Centro – Belo Horizonte – MG – CEP: 30110-060 – Brasil – Tel: +55 (31) 3409-1792 – Fax: +55 (31) 3409-1793 – e-mail: gustavo@etg.ufmg.br

RESUMO

Os aterros sanitários presentes nos grandes centros urbanos têm apresentado uma tendência à verticalização e muitas vezes estão localizados próximos a núcleos habitacionais. Com esse panorama e associado à recente necessidade de elaboração de análises de risco e planos de contingência, demanda-se a realização de estudos de estabilidade cada vez mais criteriosos, utilizando parâmetros geomecânicos mais realísticos para os resíduos sólidos urbanos (RSU). Os conceitos da mecânica dos solos, embora não totalmente apropriados, têm sido pontos de partida para estudo e interpretação do comportamento mecânico dos RSU, o que indica à necessidade do desenvolvimento de novas teorias ou adaptação das teorias existentes de sorte a ter-se modelos realistas que possam traduzir o comportamento desses materiais. Embora utilizado na avaliação de escorregamentos e avalanches, o conceito de corrida de detritos vem sendo pouco ou em nada empregado em aterros sanitários. Acidentes com dimensões catastróficas em aterros sanitários têm ocorrido em todo o mundo, inclusive no Brasil. O trabalho objetiva estudar a influência da rugosidade da superfície a jusante no alcance da massa de resíduos eventualmente escorregada. A aplicação do conceito de corridas de detritos em aterros sanitários poderá contribuir para uma melhor avaliação dos riscos envolvidos, principalmente com relação às suas consequências. A grande dificuldade no estudo e na interpretação de resultados de ensaios com RSU está associada à heterogeneidade do material, o qual apresenta diferentes tipos e dimensões de constituintes, presença de componentes que podem degradar com o tempo, entre outros. O trabalho apresenta conceitos relacionados ao tema e resultados preliminares da aplicação de um modelo de simulação de corrida de detritos a situações hipotéticas de ruptura de um aterro sanitário, considerando diferentes rugosidades da superfície a jusante. São apresentados e analisados os resultados da análise de sensibilidade do modelo em relação aos parâmetros reológicos dos materiais.

PALAVRAS-CHAVE: Corridas de Detritos, Modelagem Numérica, Resíduos Sólidos, Aterros Sanitários

INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são materiais multifásicos constituídos por fase sólida, líquida e gasosa, assim como os solos, entretanto, existe uma variação do percentual das fases constituintes com o tempo devido aos processos de biodegradação, o que resulta em constantes alterações no comportamento dos resíduos.

Nos grandes centros urbanos as áreas disponíveis para a implantação de novos aterros sanitários estão cada vez mais escassas e caras. Sendo esse o quadro, além da constante urbanização descontrolada, é comum a localização dos aterros sanitários próximos a núcleos populacionais. Expansões verticais ou alteamentos de aterros sanitários existentes têm sido efetuados de forma freqüente nas grandes metrópoles.

Problemas de naturezas diversas como operacionais, ambientais e os relacionados à estabilidade e deformabilidade ocorrem de forma freqüente nos aterros sanitários.



Vários autores citam que, se torna necessário um conhecimento mais apurado do comportamento dos maciços de RSU, a fim de caracterizar e determinar os parâmetros a serem empregados nas análises de estabilidade e modelagens.

A aplicação de conceitos relacionados às corridas de detritos pode contribuir para a elaboração de análises de risco e planos de contingência mais realistas para os aterros sanitários.

ANÁLISE DE RISCO E PLANO DE CONTINGÊNCIA

Um estudo de análise de risco é definido como sendo o desenvolvimento de uma estimativa quantitativa dos riscos baseados em avaliação de engenharia e técnicas matemáticas para a combinação de resultados das frequências e consequências de incidentes.

Aterros sanitários verticalizados e próximos de aglomerações urbanas devem merecer maiores cuidados e estudos no que diz respeito à estabilidade. Devido a essas preocupações faz-se necessário realizar estudos de análise de risco ambiental e geotécnico, bem como conceber planos de contingência, oferecendo informações de prevenção, no caso de eventuais falhas ou rupturas.

Estudos de análise de risco atuais, no geral, quando da elaboração dos planos de contingência, utilizam dados empíricos na estimativa do alcance de massa eventualmente escorregada. Usualmente são feitas referências a rupturas de outros aterros, cujas características não retratam de forma fiel a realidade para o aterro em questão.

MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS

São movimentos induzidos pela aceleração da gravidade, exceto aqueles que o material é carregado diretamente pelo meio transportador. Os movimentos são influenciados por fatores como litologia, hidrologia, geologia estrutural, topografia, clima, vegetação, ação sísmica, antrópicos e erosão.

Uma das classificações mais utilizadas atualmente, referentes aos fenômenos é a classificação de Varnes (1978), sendo essa considerada pela International Association of Engineering Geology – IAEG, como oficial. As corridas de massa ou de detritos, também conhecidas como “*Debris Flow*”, podem ser consideradas, entre os processos de deslizamento, as mais perigosas e danosas, devido ao elevado poder destrutivo e grande velocidade de deslocamento.

As corridas de detritos, de acordo com Ahrendt (2005), são causadas principalmente por chuvas repentinas e intensas ou derretimento de gelo, que gera um fluxo de detritos saturado, extremamente rápido e com alto poder de destruição. No caso dos aterros sanitários, as rupturas e, conseqüentemente as corridas, estão normalmente associados a altos níveis de poropressões no interior da massa de resíduos, tanto nos líquidos e como nos gases.

ACIDENTES OCORRIDOS EM ATERROS SANITÁRIOS

Os escorregamentos em taludes são causados por uma redução da resistência interna do material constituinte (solo e RSU) que se opõe ao movimento da massa deslizante e/ou por um acréscimo das solicitações externas aplicadas ao maciço, geralmente causadas por mudança nas condições geométricas ou sobrecargas.

Problemas de estabilidade de talude de depósitos de RSU têm ocorrido em todo o Mundo (Eid *et al.*, 2000; Stark *et al.*, 2000; Pañaloza, 1998), inclusive no Brasil, como o escorregamento no aterro sanitário Bandeirantes na cidade de São Paulo (Benvenuto e Cunha, 1991). Segundo Kölch e Ziehmman (2004), um dos acidentes mais trágicos, foi no aterro de Payatas nas Filipinas em 2000 (Figura 1).



Figura 1 – Escorregamento no Aterro de Payatas, Filipinas

MODELAGEM COMPUTACIONAL

Os movimentos de massa são induzidos pela aceleração da gravidade, exceto aqueles em que o material é carregado diretamente pelo meio transportador. Uma completa descrição dos mecanismos envolvidos e da modelagem matemática das corridas de massa são apresentadas por Iverson (1997).

Existem diversas formulações e abordagem do problema de fluxo de detritos por métodos numéricos, entre as principais pode-se citar a abordagem Euleriana, Lagrangiana, o abrangente Método dos Elementos Finitos, além da utilização do Sistema de Informação Geográfica (GIS), como ferramenta de apoio.

O programa “*DAN – Dynamic Analysis of Flow-like Landslides*”, desenvolvido por Hungr (1995), realiza a análise de corridas de detritos em condições 2D ou 3D. Segundo Hungr (1995), o modelo dinâmico DAN é baseado na solução Lagrangiana da Equação de Saint-Venant.

As duas reologias utilizadas no presente trabalho, entre as sete possíveis que o programa DAN pode utilizar, são apresentadas a seguir. As demais reologias, bem como a descrição detalhada do programa, estão descritas em Hungr (1995).

Fluxo Friccional : no qual T (força resistente da base do canal de corrida) é função apenas da tensão normal atuante (Equação 1):

$$T = A_i \cdot \gamma \cdot H_i \left(\cos \alpha + \frac{a_c}{g} \right) \cdot (1 - r_u) \tan \phi \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

a_c – aceleração centrífuga ($a_c = v^2/R$);

r_u – coeficiente de poropressão (esse parâmetro é definido como a razão entre a poropressão e a tensão normal total);

ϕ – ângulo de atrito do material ($^\circ$);

H_i – altura média entre blocos adjacentes (Equação 2).

$$\left(H_i = \frac{h_{j-1} + h_j}{2} \right) \quad (\text{Equação 2})$$

Fluxo Newtoniano Laminar: em que T é uma função linear da velocidade com a viscosidade, sendo esse determinado pela equação de Poiseuille (Equação 3).

$$T = \frac{3A_i v_i \mu}{H_i} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

v – Velocidade média do fluxo;

μ – Viscosidade dinâmica do fluido.

ESTUDOS RELACIONADOS

Estudos referentes à aplicabilidade e utilização do fenômeno denominado corrida de detritos em aterros sanitários são ainda incipientes. Iverson (1997) apresenta valores típicos para vários parâmetros com relação a materiais granulares, obtidos na análise de diversos acidentes ocorridos, entretanto ressalta-se que todos os valores são referentes a solos.

Simões *et al.* (2008) realizaram ensaios de campo em condições controladas. Para isso foram construídas rampas experimentais e foram utilizados diferentes materiais, tais como: agregados de diferentes granulometrias e umidades, matéria orgânica, RSU frescos, RSU em elevado estado de degradação e composto orgânico, além de se variar a superfície de escorregamento (solo e material sintético) e a cobertura da superfície a jusante (solo, material sintético, asfalto). A caracterização dos materiais envolveu a determinação da composição, teor de umidade e densidade. Durante os ensaios, o material em análise era posicionado na parte superior da rampa, em diversas condições de inclinação, umidade e densidade, a montante de uma comporta, sendo essa posteriormente retirada. Após a corrida ou deslizamento, eram registrados, o alcance e a forma do material escorregado. A geometria dos experimentos, principalmente quanto à inclinação, foi variada de forma a se obter as respostas em relação a esse parâmetro. Os resultados dos ensaios em rampa foram retroanalizados, com o objetivo de inferir os parâmetros reológicos dos materiais estudados.

METODOLOGIA

Utilizando-se um modelo hipotético de geometria de um aterro sanitário, que reproduz os aterros presentes nas grandes metrópoles, avaliou-se a influência da rugosidade da superfície a jusante, no alcance da massa escorregada, com três superfícies de rupturas denominadas Situação 1, 2 e 3. A geometria, caracterizada por taludes de RSU, com inclinação 1 (V) : 2 (H) e altura de 5 metros, bermas de 5 metros e altura total de 60 metros, é apresentada na Figura 2.

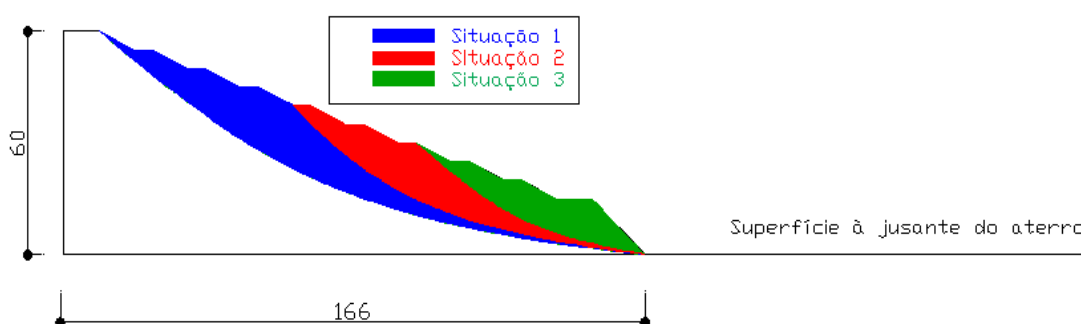


Figura 2 – Geometria do aterro hipotético e superfícies de ruptura.

Foi utilizado o programa DAN-W para as simulações. A Figura 3 ilustra a massa de RSU, para a Situação 1, durante a simulação do escorregamento pelo programa DAN-W.

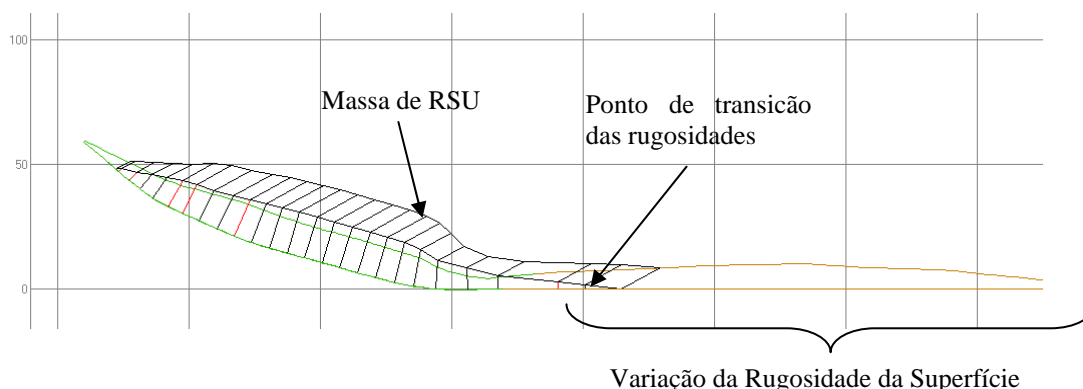


Figura 3 – Exemplo de simulação para a Situação 1

Os valores dos parâmetros reológicos dos RSU (ângulo de atrito, ângulo de atrito interno e viscosidade) foram baseados nos resultados obtidos por Simões *et al.* (2008), que simularam em experimentos de campo o escorregamento de RSU e retroanalísaram os resultados obtidos com o emprego do programa DAN-W.

RESULTADOS

A análise preliminar dos experimentos realizados indica nítidas correlações entre as propriedades dos materiais e as condições geométricas com o alcance da massa, tais como: o acréscimo da rugosidade da superfície reduz o alcance da massa escorregada de forma acentuada. Os resultados de deslocamento mostrados nas figuras 4, 5 e 6 são referentes ao deslocamento da frente da massa em relação ao final do aterro.

A Figura 4 mostra os resultados obtidos, utilizando o modelo Friccional, e variando o ângulo de atrito da superfície a jusante numa faixa de valores entre 15° e 40°. Os parâmetros da massa de RSU utilizada nessa análise, foram $\gamma = 8 \text{ kN/m}^3$, ângulo de atrito = 29° e ângulo de atrito interno = 35°.

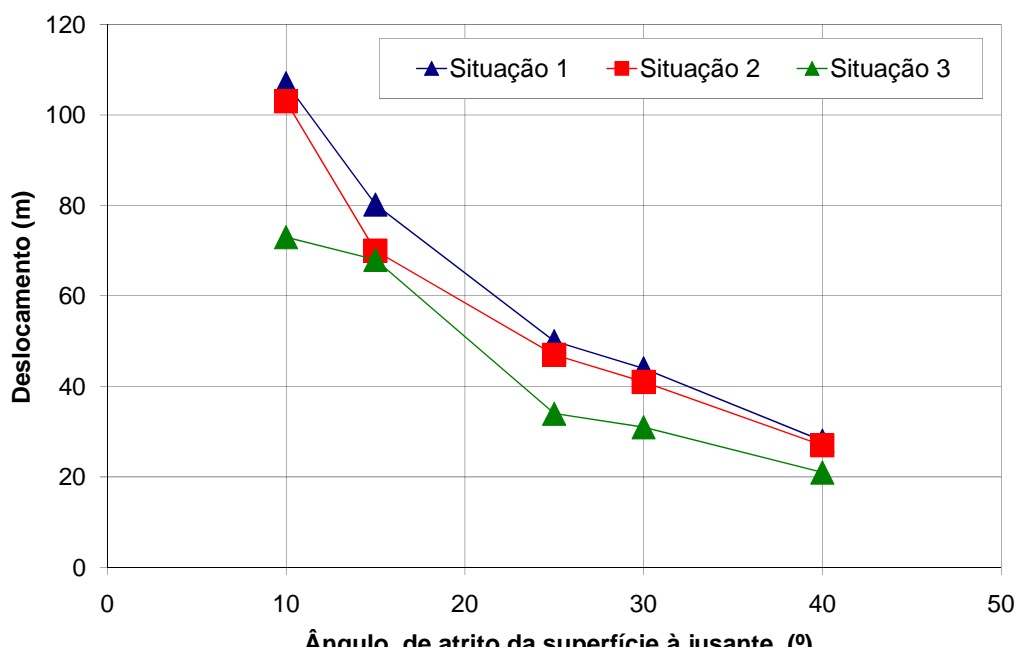


Figura 4 – Resultados das análises pelo programa DAN-W – Material Friccional.

A Figura 5 ilustra os resultados obtidos, utilizando o modelo Friccional, e variando o ângulo de atrito da superfície a jusante entre 15° e 40°. Os parâmetros da massa de RSU utilizada nessa análise, são $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$, ângulo de atrito = 27° e ângulo de atrito interno = 30°.

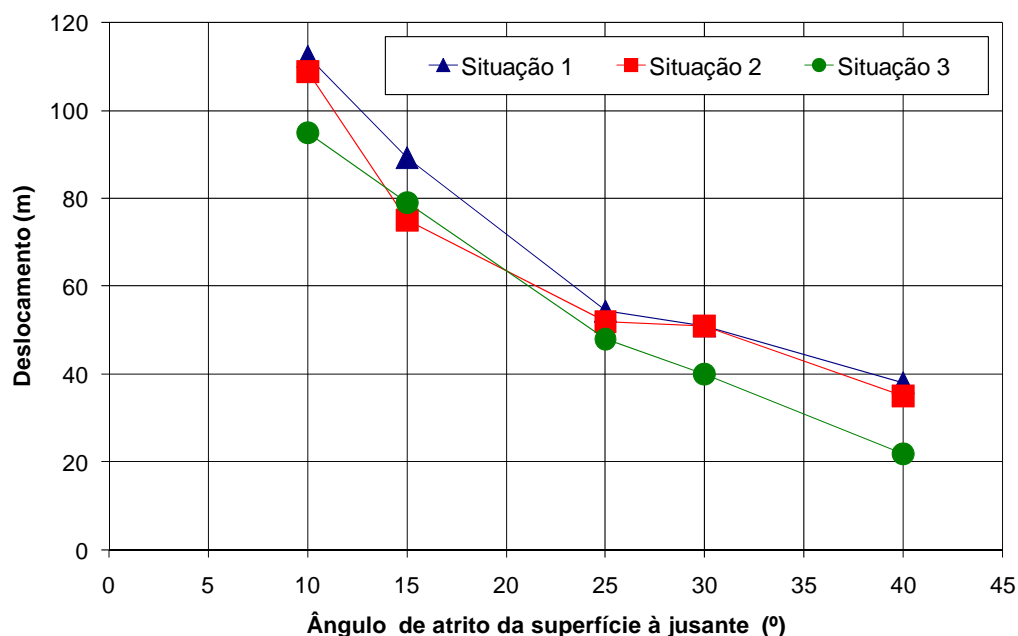


Figura 5 – Resultados das análises pelo programa DAN-W – Material Friccional

Simões e Oliveira (2008) citam que devido à inexistência de dados de viscosidade para os RSU, a faixa de variação desse parâmetro foi baseada no trabalho de Vargas *et al.* (1997), que ao estudar o movimento de massa em diferentes acidentes relacionados a solos na Cidade do Rio de Janeiro, ocorridos no ano de 1996, obtiveram, em retroanálise, valores para esse parâmetro entre 0.092 e 0.209.

O valor de viscosidade que melhor ajustou-se aos resultados do ensaios de campo foi $v = 0,1$ kPa, de acordo com a metodologia empregada por Simões e Oliveira, (2008).

Utilizando-se o modelo Fluido Newtoniano, obtêm-se as curvas mostradas na Figura 6, para tal foram utilizadas uma viscosidade = $0,1 \text{ kN/m}^2$ e peso específico do material - $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$, variando-se a viscosidade.

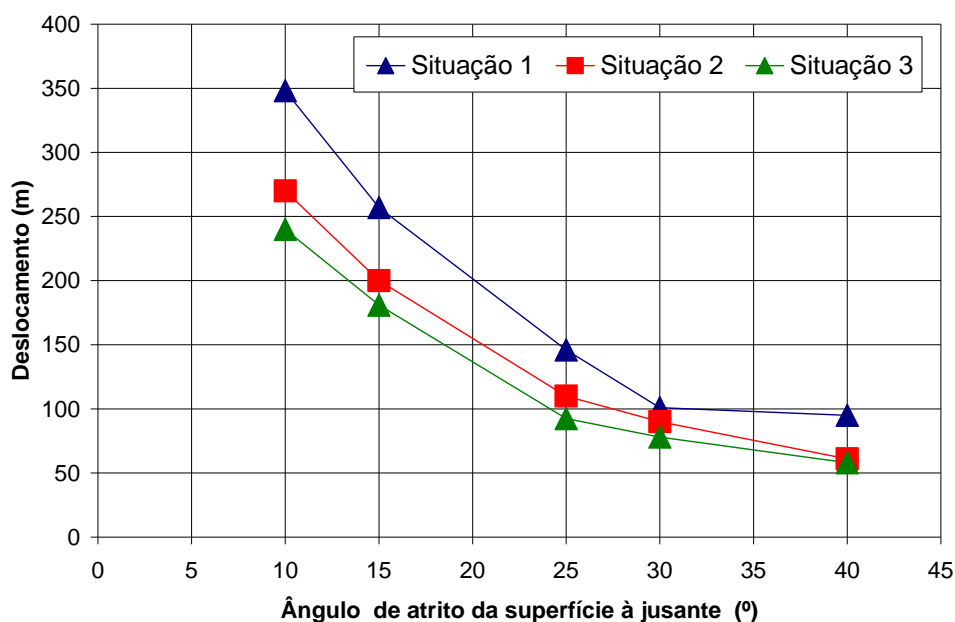


Figura 6 – Resultados das análises pelo programa DAN-W – Material Fluido Newtoniano.

A simulação numérica dos cenários hipotéticos de possíveis rupturas mostram relação direta entre o alcance da massa e o volume de material escorregado, com as condições de elevadas poropressões no interior da massa de resíduos, e inversa em relação ao atrito e viscosidade dos materiais envolvidos.

CONCLUSÃO

O trabalho apresenta resultados preliminares de simulações numéricas da corrida de detritos em aterros sanitários. Os resultados, em termos de deslocamentos da massa escorregada, confirmaram algumas tendências esperadas, mostrando relações diretas entre o acréscimo da rugosidade da superfície a jusante do aterro e a redução do alcance da massa escorregada.

Acredita-se que a realização de experimentos em condições controladas, associada à utilização de ferramentas computacionais que permitam a retroanálise dos parâmetros reológicos dos resíduos sólidos urbanos, possibilitem a obtenção de parâmetros mais reais e contribuam para a elaboração de análises de risco e planos de contingência mais criteriosos para estruturas com comportamento extremamente complexo, como os aterros sanitários.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Superintendência de Limpeza Urbana de Belo Horizonte, pelo apoio na realização dos ensaios de campo; à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pela concessão de Bolsa de Iniciação Científica ao segundo autor, e ao Professor O. Hungr, por gentilmente disponibilizar o programa DAN-W.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AHRENDT, A. (2005) – *Movimentos de Massa Gravitacionais – Proposta de um Sistema de Previsão: Avaliação de uma Área Urbana de Campos do Jordão – SP*. Tese de Doutorado – USP, São Carlos.
2. BENVENUTO, C.; CUNHA, M. A. (1991) – Escorregamento em massa de lixo no aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo, SP. In: *Anais do 2º Simpósio sobre barragens de rejeitos e disposição de resíduos – REGEO'91*. Rio de Janeiro, vol. 2: 593 - 601;
3. EID, H.T, STARK, T.D., EVANS, W.D., SHERRY, P.E. (2000) – Municipal solid waste slope failure. II Stability Analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. vol. 126 (5), pp.408 – 419;



4. HUNGR, O. (1995) – A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(4):610-623p.
5. IVERSON (1997) – The physics of debris flows. *Rev. Geophys.*, 35, 245–296p.
6. KÖLSCH, F.; ZIEHMANM, G. (2004) – Landfill stability: Risks and challenges. *Waste Management World*. May-June, 55-60p.
7. PAÑALOZA, H. C. (1998) – Deslamiento de basura en el Relleno Sanitario Dona Juãna. In: *Anais do 26º Congresso da Associação Interamericana de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Lima, Peru.
8. SIMÕES, G. F ; OLIVEIRA, M.A.N; BATISTA, H. P. (2008) – Estudo Preliminar do Comportamento Geomecânico de Diferentes Materiais Aplicado às Corridas de Detritos. In *14 Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Búzios.
9. SIMÕES, G. F.; OLIVEIRA, M.A.N. (2007) – Avaliação Preliminar da Corrida de Detritos em Aterros Sanitários. In: *Anais do VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental e V Simpósio Brasileiro de Geossintéticos*, 2007, Recife. Recife: ABMS, p. 1-8.
10. STARK, T.D., EID, H.T, EVANS, W.D., SHERRY, P.E. (2000) – Municipal solid waste slope failure. I: Waste and foundation soil properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. vol. 126 (5), pp. 397 – 407.